

# 沿岸漂砂による海浜変形の相似則とその妥当性の検討

DYNAMIC SIMILARITY OF BEACH CHANGES DUE TO LONGSHORE TRANSPORT AND VERIFICATION OF ITS APPROPRIATENESS

渡辺宗介<sup>1</sup>・清野聡子<sup>2</sup>・宇多高明<sup>3</sup>・芹沢真澄<sup>4</sup>

Shu-suke WATANABE, Satoquo SEINO, Takaaki UDA and Masumi SERIZAWA

<sup>1</sup> 学生会員 東京大学大学院総合文化研究科 (〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1)

<sup>2</sup> 正会員 農修 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科助手 (同上)

<sup>3</sup> 正会員 工博 国土技術政策総合研究所研究総務官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

<sup>4</sup> 正会員 海岸研究室 (有) (〒160-0011 東京都新宿区若葉 1-22 ローヤル若葉 208 号)

Dynamic similarity of beach changes due to longshore transport was investigated. A relation that longshore sand transport is proportional to  $h_c^{5/2}$ , where  $h_c$  is a closure depth, is introduced to derive time scale of beach changes:  $[t_2] / [t_1]$  is given by  $[l_2]^2 / [l_1]^2 \cdot [h_{c1}]^{3/2} / [h_{c2}]^{3/2}$ , where subscripts 1 and 2 show the prototype and model, and  $l$  is the length scale. Effectiveness of this relation is tested by using the data sets of beach changes measured near the Katakai fishing port as a prototype and those on Odaiba beach as a model beach. Considerably good agreement was obtained.

**Key Words:** dynamic similarity, shoreline change, closure depth, Katakai fishing port, Odaiba beach

## 1. まえがき

海浜変形問題については数値シミュレーションによる検討が盛んであるが、水理模型実験も検討のための主要な道具の一つである。しかし、移動床水理模型実験では、漂砂の相似則が確立していないために、水理についてはフルードの相似則を適用する一方で、砂移動についての相似条件が満足されないまま実験が行われると、最終段階において実験結果の現地海浜への適用性に疑問が残されることになる。このことから、漂砂に関する相似則の確立が強く求められている。ところで、現地海浜での海浜変形に関する多くの実測(例えば、宇多<sup>1)</sup>)によれば、長期的海浜変形に大きな影響をもたらすのは沿岸漂砂の作用であることが現地データから明らかにされている。したがって、沿岸漂砂のみに絞って相似則について検討することも十分意味のあることと考えられる。そこで、本研究では、沿岸漂砂が突堤や防波堤によって阻止された場合の海浜変形を対象として相似則について検討する。まず、次元解析により相似則を見出した上で、現地海岸として千葉県九十九里浜の片貝漁港周辺の海浜変形を、模型海浜としてお台場海浜公園内の海浜変形を選び、それらのデータを基に主として時間縮率について検討する。

## 2. 沿岸漂砂による海浜変形の相似則

沿岸漂砂による海浜変形について考える。図-1に示すように一方向の卓越沿岸漂砂が防波堤や突堤によって阻止された場合の海浜変形を考える。沿岸漂砂量を $Q$ 、水平方向の距離を $l$ 、水深方向の代表高さを $h$ 、経過時間を $t$ としたとき、図-1の突堤によって阻止された部分に堆積する土砂量 $V$ について考える。まず $V$ は土砂収支が成立することから、上手から流入する沿岸漂砂量 $Q$

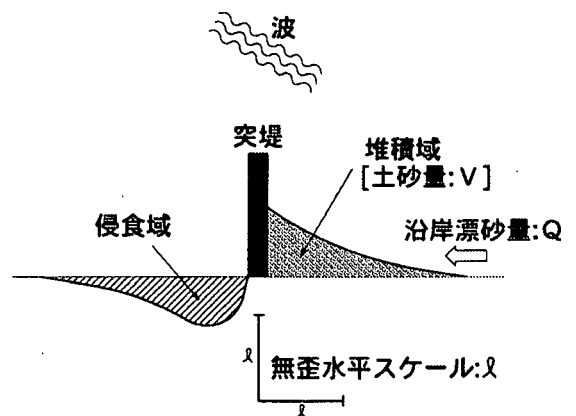


図-1 相似則を適用する海浜変形現象の模式図

に経過時間  $t$  を乗じたものに等しい。また  $V$  は堆積域の面積  $S$  にその厚さ  $h$  を乗じたものに等しい。また筆者ら<sup>2)</sup>が示したように、突堤に隣接する堆積域では相似形を保ちつつ三角形状に汀線が前進することから、三角形状の堆積域の沿岸方向のスケールは突堤基部での汀線前進量に正比例する。よって面積  $S$  は、汀線変化量や汀線変化の生じる沿岸方向の長さなど幾何学的意味での水平スケールの2乗に比例する。一方、 $h$  は幾何学的意味での鉛直スケールを表し、それは移動高のような沿岸漂砂の生じる鉛直方向の厚みに対応している。

以上を次元解析の表示式として表せば式(1)となる。ここに  $[ ]$  は次元量を表す。

$$[V] \propto [Q] \cdot [t] = [l]^2 \cdot [h] \quad (1)$$

式(1)において、実物と模型にそれぞれ添字1, 2を付けて区別すると、実物と模型における時間スケールの比  $[t_2] / [t_1]$  は、式(2)のように表される。

$$\frac{[t_2]}{[t_1]} = \frac{[Q_1]}{[Q_2]} \cdot [l_2]^2 / [l_1]^2 \cdot [h_2] / [h_1] \quad (2)$$

一方、宇多<sup>1)</sup>は、全国各地での実測沿岸漂砂量と、波による地形変化の限界水深  $h_c$  の関係を調べた結果、沿岸漂砂量の絶対値と  $h_c$  の間に式(3)の関係が成立することを示した。

$$|Q| = 780h_c^{5/2} \quad (3)$$

すなわち  $[Q]$  は  $h_c^{5/2}$  に比例する。ここで、式(1)の  $h$  の代わりに  $h_c$  を用いれば、式(3)の関係から式(2)は式(4)となる。

$$\frac{[t_2]}{[t_1]} = [l_2]^2 / [l_1]^2 \cdot [h_{c1}]^{3/2} / [h_{c2}]^{3/2} \quad (4)$$

完全なスケールモデルの場合には、 $[l_2] / [l_1] = [h_{c2}] / [h_{c1}]$  が成立するので、

$$\frac{[t_2]}{[t_1]} = [l_2]^{1/2} / [l_1]^{1/2} \quad (5)$$

となってフルードの相似則となる。一方、歪み模型の場合には、 $[l_2] / [l_1] \neq [h_{c2}] / [h_{c1}]$  であるから、式(4)が時間に関する相似則を与える。式(4)は、時間縮尺が水平スケールと鉛直スケール比の組み合わせによって定まることを示しており、それぞれが独立した量として定められれば、時間縮尺が決定される。また  $h_c$  は波浪・底質条件から決定される。

### 3. 九十九里浜片貝漁港周辺の海浜変形 - 実物として

#### 3.1 空中写真の判読

筆者ら<sup>2)</sup>は昨年の海洋開発シンポジウムにおいて、九十九里浜に位置する片貝漁港周辺の汀線変化を明らかにしたが、本研究ではこのデータを相似則検討のための実物データとして利用する。九十九里浜は太平洋に面する延長約60kmの細砂からなる砂浜海岸である。この海岸の北端には未固結の砂岩・泥岩からなる屏風ヶ浦の海食崖があり、そこからの供給土砂が九十九里浜の形成に預かってきた。また、南端には屏風ヶ浦と同様な海食崖の太東崎があり、そこからの供給土砂は北向きに流れ、これも九十九里浜の形成に役だってきた<sup>1)</sup>。九十九里浜の中央部に位置する片貝漁港沖における1990～1992年の波向別波高出現頻度によれば、SEからの波が全体の約23%、ESEが約21%と、片貝漁港周辺の海岸線に対してほぼ直角方向からの入射波が多い。しかし片貝漁港での海岸線への法線の方向がE36°Sであることを考慮すると、海岸線への法線に対して反時計回りの方向からの入射波がやや卓越している。このことより、片貝漁港では沿岸漂砂の方向が変動するものの、ネットでは南下する方向の沿岸漂砂が卓越する<sup>2)</sup>。

片貝漁港は作田川の河口部に位置し1960年から建設が始められた。漁港防波堤の建設とともに、その周辺域では大きな海浜地形変化が生じている。写真-1に1961年～1997年に撮影された5枚の空中写真を示す。

1961年では、作田川河口の左岸側に汀線までの長さを持つ河口導流堤があり、それに沿うようにして狭い水路が開いていた。旧片貝漁港は河口の陸域を掘削して造られた典型的な河口港であるが、この当時はまだ建設途中で漁港と河口はつながっていない。この時期には海岸線に沿って幅約200mの様な砂浜が延びていた。その後、右岸側にも導流堤が伸ばされると同時に漁港と河口が水路で結ばれ、漁港が使用され始めた。しかしこの海岸では南向きの沿岸漂砂が卓越すると同時に、緩勾配で漂砂移動が活発なために河口に砂が堆積しやすく、航路として使用可能な水深と幅を維持するのは非常に困難であった。このような状況下で、航路の安全を確保し、河口部への砂の流入を阻止するため、これ以降河口導流堤がさらに沖へ延長された。この導流堤の延長と合わせて河口の北側では堆砂が急激に進み、汀線が前進していった。

このように汀線が前進する中で、その効果を発揮するために1970年には導流堤が約400mまで延ばされた(写真-1)。そのため1970年には北側では大きく汀線が前進し、南側では砂の供給が減ったため汀線の後退が始まった。また1961年では海岸線に沿って連続的に砕波線が見られるのに対し、1970年では砕波線が導流堤先端で不連続になっている。このことは、それ以前までは南向

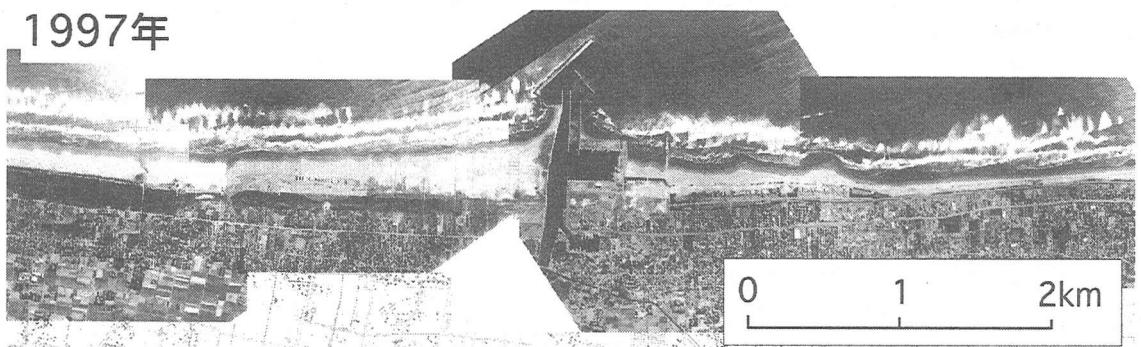
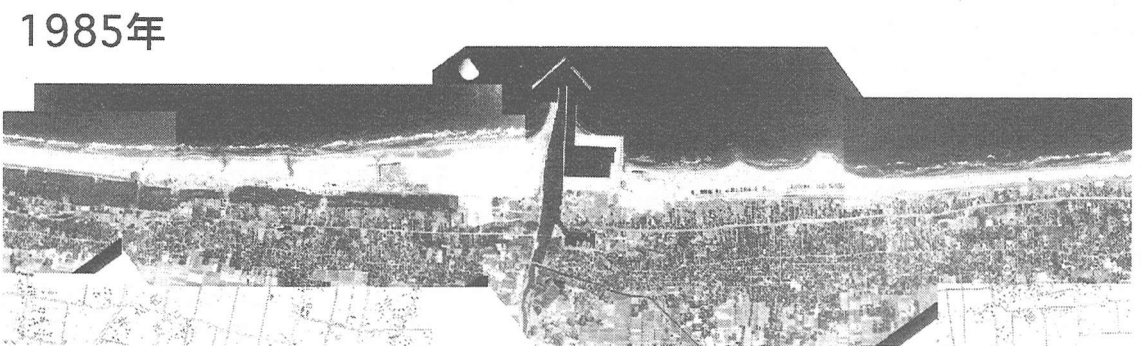
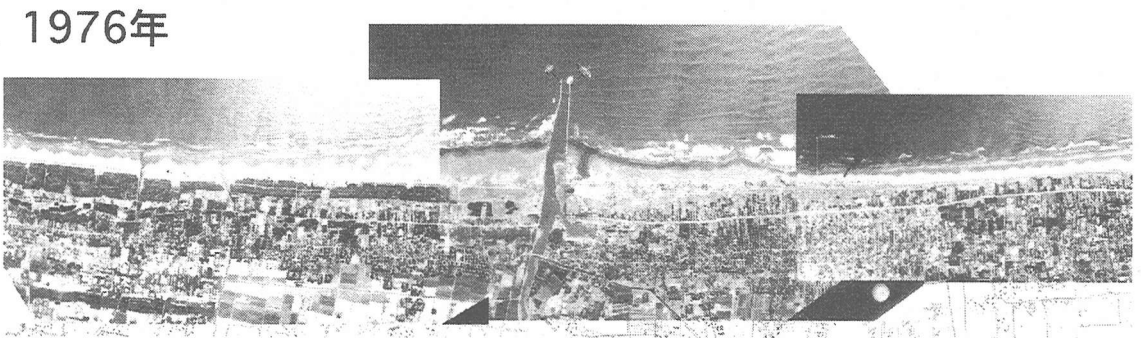
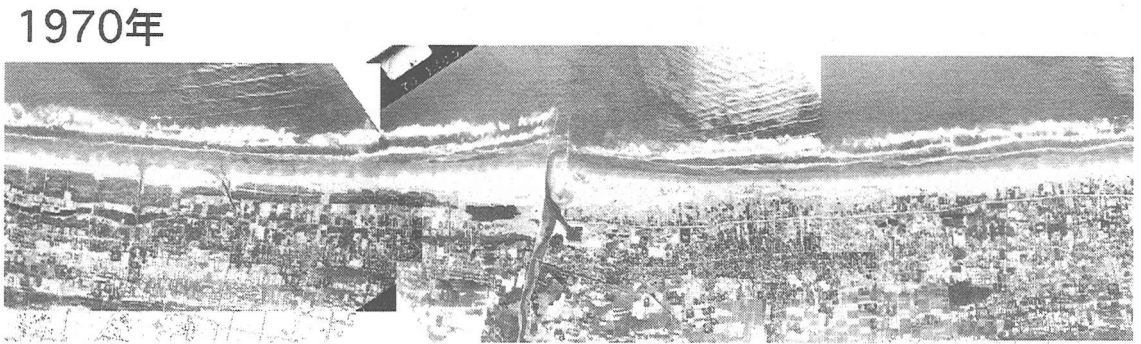
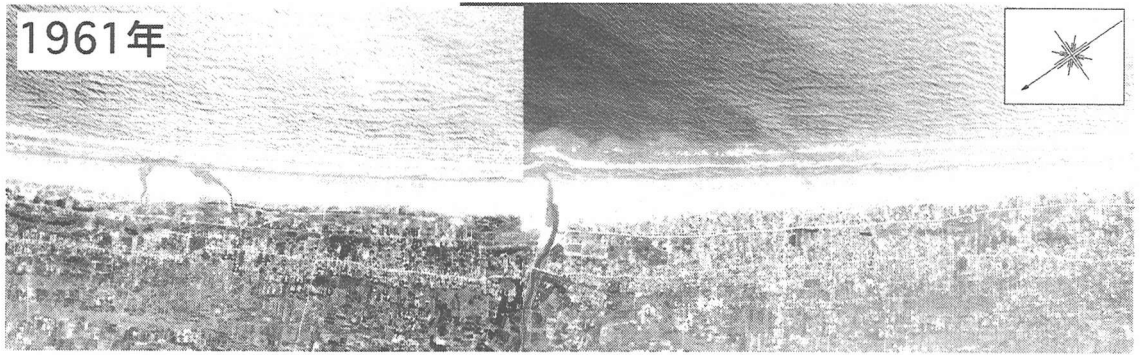


写真-1 片貝漁港周辺の空中写真（1961～1997年）

きの沿岸漂砂が連続的に導流堤先端を迂回して下手方向に流れていたが、導流堤長が長くなったあとは流れにくくなったことを意味している。

その後も砂による航路埋没を防ぐために、1970年から3年間で左右岸の導流堤はさらに約200m延長されるとともに、河口では大規模な掘削が行われた。これに伴い導流堤の北側ではさらに汀線が前進し、南側の導流堤の付け根では導流堤自身による波の遮蔽効果で局所的に汀線が前進したが、導流堤から離れた場所では侵食されて汀線が凹状になった。

このように河口部の砂の堆積を阻止する目的で伸ばされた導流堤であったが、あまり堆砂防止効果は上がらず、河口部は慢性的な航路障害を起こしていた。そのため、さらに様々な対策が試された。写真-1に示すように、1976年から導流堤の先端に「ハ」の字型の防波堤が建設された。さらに導流堤の両側に防砂突堤が建設された。

導流堤の北側での汀線変化は、導流堤が約600mまで伸ばされた1973年以降著しくなり、1983年までに防波堤の付け根での汀線前進量は約260mに達した。また導流堤の北側区域で導流堤が大きく伸ばされる前の1965年と比較して、汀線が前進した区域は北側約2.7kmに及んだ。

写真-1に示すように、1985年には漁港南側での新たな施設の整備が進み、コの字型の泊地が完成した。その後1994年には「ハ」の字型防波堤のうち北側の部分が延長されて防波堤の遮蔽効果が上がったために、コの字型泊地の海側を守る護岸の基部に砂が堆積して三角形の前浜が形成された。1997年にはハの字型防波堤の北側部分がさらに延長され、遮蔽域が南側に大きく広がった。これに合わせて、コの字型泊地の外側に新たに三角形の砂浜が形成された(写真-1)。この間の堆積土砂は、この海岸での卓越漂砂である南向きの沿岸漂砂によって運ばれたのではなく、波の遮蔽効果によって南側の海岸で発生した局所的な北向き沿岸漂砂によって運ばれたものと考えられる。さらに、1997年には作田川河口の南約700mに突堤が建設された。1997年までに片貝漁港の北側では前浜が大きく広がり、これと対照的に南側離岸堤より南側では汀線が後退して、前浜幅が約90mまで狭まった。

### 3.2 汀線変化

片貝漁港の防波堤北側区域での汀線変化を分析する。まず図-2に示すように、旧漁港の北端を原点に取って北向きに基線を定め、基線上に0.5kmおきに8測点を設けた。次に写真-1,2,3より基線から汀線までの沖向き距離と、基線から防波堤(導流堤)先端までの沖向き距離を読み取った。ただし1961年は河口部に局所的に砂が堆積しており、これを基準とするとその影響が顕著に

残されることから1965年を基準とした汀線変化量を算出した。

1965年を基準とした汀線変化を図-3に示す。これによると、漁港の防波堤に最も近接する地点1における汀線変化量が最も大きく、32年間で332m前進したことが分かる。また前進速度は防波堤を伸ばし始めた当初は大きかったが、徐々に小さくなっていく傾向が見られる。地点1における汀線の平均前進速度は10.4m/yrであった。防波堤から北側に離れるにしたがい汀線変化量は小さくなり、防波堤から約3.7km離れた地点8では汀線はほとんど変化していない。

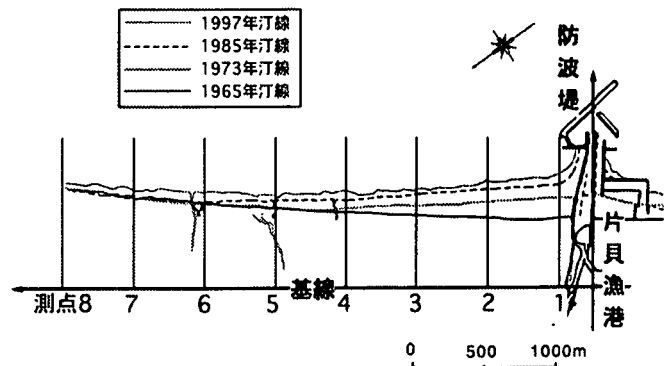


図-2 片貝漁港北部に定めた基線と測点

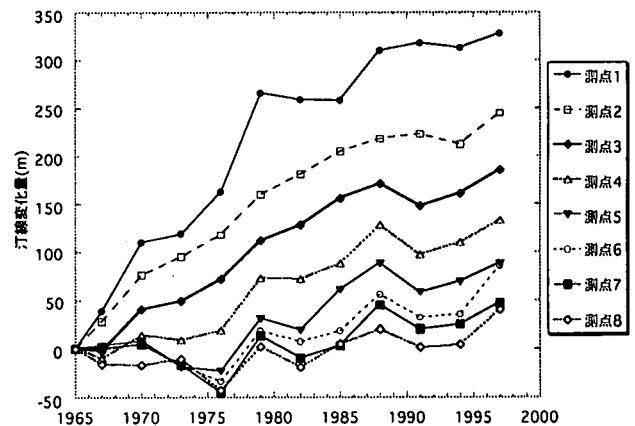


図-3 1965年を基準とした汀線変化量

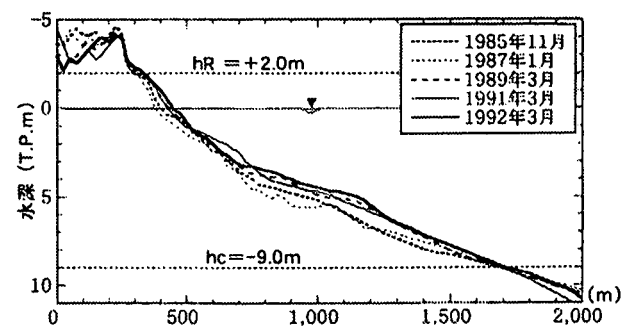


図-4 片貝漁港北側に隣接する測線 No.1 における海浜縦断面の変化

### 3.3 海浜縦断形の変化

宇多ら<sup>3)</sup>は片貝漁港の北側に隣接する図-2に示した測線No.1における1985年から1992年までの海浜縦断形の変化を図-4のように示した。この図によれば、地形変動は防波堤の先端付近の-4mから-6m付近では大きく、それより岸側・沖側で減少する。しかし沖合ではほぼ-9mで地形変化は見られなくなる。このことから、この海岸での $h_c$ はほぼ-9mにあることが分かる。同様にして顕著な地形変化が見られなくなる限界の高さ $h_R$ は約2mとなる。

## 4. お台場海浜公園での海浜変形 - 模型海浜として

お台場海浜公園の人工海浜では、試験用に設置された板柵によって沿岸漂砂が阻止され、板柵の両側で特徴的な海浜変形が生じていた。筆者らは学生実習の対象として本海浜を選定し、1999年から観測を行っている。清野ら<sup>4)</sup>では、1999年に取得したデータの一部を報告したが、ここではさらに解析を行う。

図-5は、1999年1月12日の汀線測量から得られた汀線形状である。板柵は不透過性であり、突堤と同様な沿岸漂砂阻止効果を有している。このため、板柵の南側では汀線が板柵に接近するほど前進し、逆に北側では汀線が凹状になっている。このような汀線形状より、この地点において明らかに北向きの沿岸漂砂が卓越していることがわかる。

図-6は海浜縦断面形の比較図である。板柵を挟んで左右の海浜地形の相違を明らかにするために、板柵の両端から南北に同距離にある測線の縦断形を重ね書きしている。陸上部で一部重なりを示さない部分もあるが、大部分の測線の縦断形は非常によい重なりを示しており、北側の測線では鉛直上方に凹状の、また南側の測線では凸状の縦断形になっている。南側ではいずれの測線

でもバームの発達が見られる。図示する縦断形の変化は、沿岸漂砂による地形変化の典型例を示しており、波のうち上げ限界 $h_R$ が約0.35m、波による地形変化の限界水深 $h_c$ が約0.8mであることが分かる。

図-6において、0m地点では明らかに波の作用を受けていない場所まで地形変化が見られるので省略し、2~10m地点の5断面の縦断形より、海浜断面面積の変化量 $\Delta A$ と汀線変化量 $\Delta y$ を読み取り $\Delta A$ と $\Delta y$ の比を計算すると、これらの比は平均で0.88mとなる。この比は漂砂の移動高に等しいので、移動高は平均で0.88mと得られる。

図-5に示した汀線形状によれば、板柵の南側では板柵に接近するほど汀線が沖に突出している。板柵が設置される以前の汀線は沿岸方向になだらかに伸びていた。したがって図-5において、板柵の南側で直線的な汀線を板柵に向かって外挿することが可能であろう。図-5にはその線を破線で記入してある。汀線の変化は反時計回りに変化しているが、この方向角の変化は初期汀線に対する波の入射角に等しい。図より、反射などの影響のない沿岸距離-10m~-20mの範囲に着目してこの方向角を測ると、波の入射角は $10^\circ$ となる。これは筆者ら<sup>2)</sup>

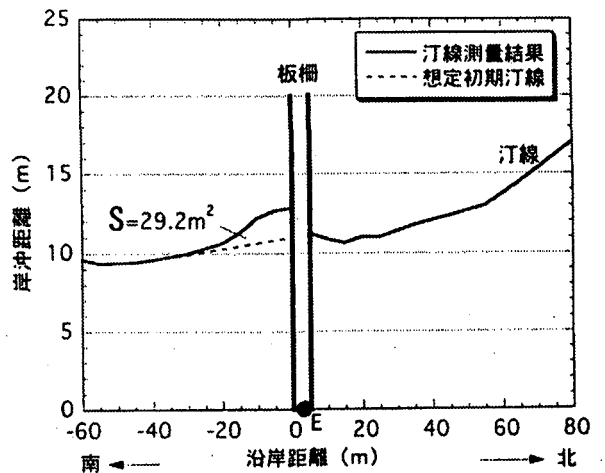


図-5 お台場海浜公園の人工海浜における汀線変化

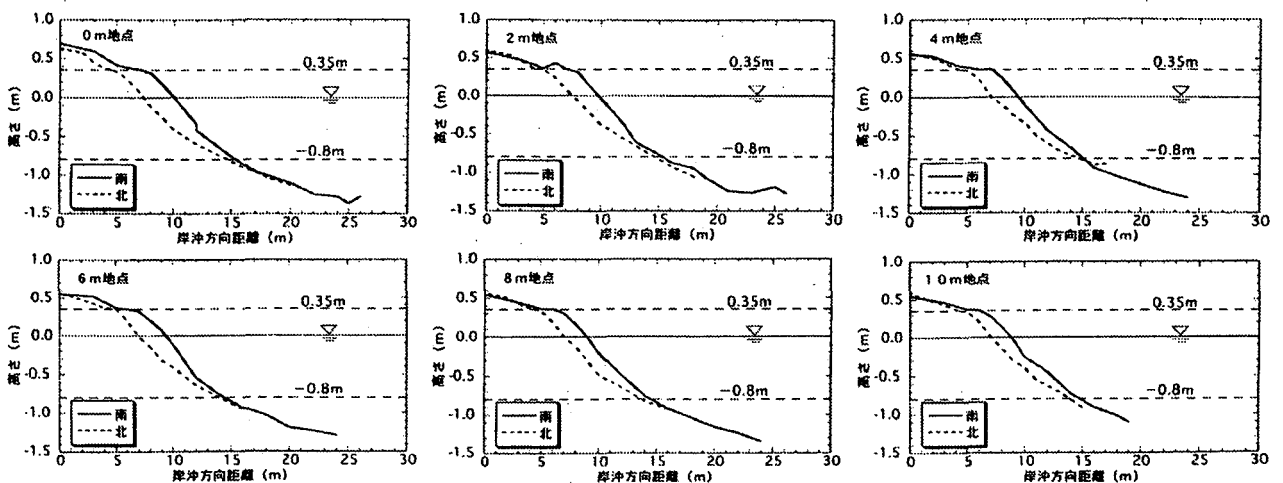


図-6 海浜縦断形の変化

が示した片貝漁港での波向角  $7^\circ$  とほぼ同程度の条件となっている。破線と実線に挟まれた範囲は、板柵の設置に伴って沿岸漂砂が阻止され、それによって汀線が前進した区域である。この面積を求めると、 $S = 29.2\text{m}^2$  となる。一方、漂砂の移動高はすでに  $0.88\text{m}$  と求められているので、この値を汀線の前進面積  $29.2\text{m}^2$  に乗じると、堆積土砂量は  $25.6\text{m}^3$  となる。板柵はほぼ10月中旬に設置されたのに対し、実習が行われたのは1月中旬である。したがって経過期間は約3ヶ月となる。そこで、上述の推定堆積土砂量を期間長で除し、年間の漂砂量を算出すれば、沿岸漂砂量は  $102\text{m}^3/\text{yr}$  となる。

## 5. 相似則の適用

片貝漁港周辺の海浜変形を実物とし、お台場海浜公園での観測結果をモデルとして、時間スケール比  $[t_2] / [t_1]$  を式(4)から算出してみる。水平スケールとして汀線の前進量を選べば  $l_1$  が約  $300\text{m}$ 、 $l_2$  が約  $3\text{m}$  であり、さらに  $h_{c1} = 9\text{m}$ 、 $h_{c2} = 0.8\text{m}$  を式(4)へ代入すると、 $[t_2] / [t_1] = 3.8 \times 10^{-3}$  となる。お台場では約3ヶ月で地形変化が生じたと推定されるので、これを現地時間に換算すると約66年となる。図-2によれば、片貝漁港周辺での汀線変化は実際には39年を要している。お台場海浜公園の場合、汀線の時系列的変化が十分詳細に観測されていないので誤差があることを考慮すれば、計算値はやや過大であるがかなり近い値と考えられる。一方、漂砂量比は、 $[h_{c2}]^{5/2} / [h_{c1}]^{5/2} = 2.3 \times 10^{-3}$  である。お台場海浜公園での実測値  $102\text{m}^3/\text{yr}$  から現地漂砂量を算定すると、 $4.4 \times 10^4\text{m}^3/\text{yr}$  となる。この値は地質年代スケールから推定された沿岸漂砂量  $1.0 \times 10^4\text{m}^3$  の44%の値である。長期的な海浜変形から推定された値と比較してやや小さいが、この理由としては、お台場海浜公園での汀線変化が実際には3ヶ月未満で起きたが、測定間隔が長かったことから汀線変化の生じた期間が過大であり、この結果測定漂砂量が過小評価されたことが考えられる。また地質年代の時間スケールでの沿岸漂砂量の推定にも当然誤差が含まれている。これらを勘案すれば両者はかなりよい対応を示すと考えられる。

ここで観測時期の相違がもたらす影響について考察する。例えばお台場海浜公園での調査は突堤建設後約3ヶ月で行われたが、調査時期が1週間後や6カ月後では結果が異なるのではないかと疑問が生じる。この点について式(4)をもとに考える。まず、お台場海浜公園と片貝漁港周辺の海浜を選定した時点で、式(4)における  $[h_{c2}]^{3/2} / [h_{c1}]^{3/2}$  は観測時期によらず一定である。この場合、 $[t_2] / [t_1]$  は  $[l_2]^2 / [l_1]^2$  に比例することに

なる。この関係は、渡辺ら<sup>2)</sup>が示した  $l \propto \sqrt{t}$  の関係を満足する。結局、式(4)は観測時期の差に伴う汀線変化量の差も考慮される。よって観測時期によらず、式(4)で時間スケール比  $[t_2] / [t_1]$  を求めることができる。ただし、式(4)における  $[t]$  は突堤建設直後からの経過時間であり、 $[l]$  は突堤基部における突堤建設直後からの汀線変化量であることに注意を要する。

本研究では、実物として片貝漁港周辺の海浜変形を、モデルとして東京湾内のお台場海浜公園の海浜変形を選び、式(4)に基づいて両者の時間縮尺について論じたが、移動床平面水理模型実験において時間縮尺を定めるには、あらかじめ実験における  $h_c$  が必要とされる。これには類似の実験で得られた  $h_c$  を用いるか、あるいは実験データがない場合には佐藤・田中の表層移動限界式から  $h_c$  を推定すれば良いと考えられる。

## 6. あとがき

本研究では、卓越した沿岸漂砂が突堤や防波堤によって阻止された場合に生じる海浜変形に関する相似則を示した。次に、九十九里浜の片貝漁港周辺の海浜変形を実物とし、東京湾内のお台場海浜公園内の人工海浜に試験的に設置された板柵周辺の海浜変形をモデルとして相似則の適用を行い、ほぼ妥当な結果を得ることができた。お台場海浜公園で学生実習として比較的簡易に観測された現象が、現地海浜では数十年にわたる現象に相当するということになる。このことは、小規模な海浜での現象であるから無意味なものではなく、縮小模型として小規模な海浜が存在しているという考え方を理解すれば、そこでの現象の観察も砂浜のダイナミズムの理解に役立つと考えられる。

## 参考文献

- 1) 宇多高明：日本の海岸侵食，山海堂，p.442，1997。
- 2) 渡辺宗介・宇多高明・芹沢真澄・清野聡子・三波俊郎・古池 鋼：汀線変化の解析解の九十九里海岸への適用とそれに基づく漂砂量の諸係数の評価，海洋開発論文集，第17巻，pp.457-462，2001。
- 3) 宇多高明・高田 修・星上幸良・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼：九十九里海岸における地質年代スケールの沿岸漂砂量の推定，海岸工学論文集，第47巻，pp.686-690，2000。
- 4) 清野聡子・渡辺宗介・萩谷 宏・池内幸介・猪内 学・木村 宰・峠井正雄・外山大・松本泰輔・宇多高明・石川仁憲：学際学科における海岸実習 - お台場人工海浜の自然的・社会的仕組みを学ぶ，海洋開発論文集，第15巻，pp.641-646，1999。